复杂无线网络的控制与管理方法研究

石晶林 张玉成

摘要：现代网络的发展已经越来越呈现出多样性、互融合、协同发展的非线性“动力学”特点。本文将从网络“融合”增长的分形动力学特征视角出发来分析未来无线网络控制管理的研究方法。研究针对未来无线网络融合与其物理表象发展这条主线展开，探讨无线网络控制管理的科学基础理论，最后介绍计算所无线通信技术研究中心根据无线网络发展与产业需求所做的研发工作部署。

关键词：复杂无线网络 控制管理 动力学

1 引言

自上世纪 80 年代信息技术进入高速发展的通道以来，至今已有 30 多年的历程，但目前仍未见其有丝毫减慢的迹象出现。由于材料科学、计算机科学、高频谱效率的信号处理技术和基于网络的信息应用技术的进步，这种发展反而有进一步加速的趋势。特别是进入 2000 年以后，基于通信网络的信息技术应用已经渗透到社会生活的方方面面，随着信息网络社会化，通信网络的发展和应用已经与人们的社会生活深深地交融在一起[1]。在电脑、手机、智能终端等平台上通过各种通信连接建立的虚拟世界实现购物、交友、写日记、管理财产等已经成为很大一部分人的生活习惯。而下一代网络技术“无线网络长期演进（Long Terms Evolution, LTE）”的泛 IP[1]化使无处无时不在的个性化连接越来越普及。这使得“亚马逊蝴蝶效应”成为网络世界时时处处存在的隐患——网络中发生的任一事件如果没有得到有效控制，都可能对物理社会造成巨大破坏。如何才能对网络进行有效控制，特别是在泛无线化网络时代怎么样发展和控制管理好网络成为了当前无线通信网络发展面临的巨大问题。

本文通过分析无线网络的需求变化，从网络“融合”增长与业务流的动力学特征视角出发来分析未来无线网络控制管理的研究方法，最后介绍中科院计算所无线通信技术研究中心根据无线网络发展与产业需求所做的研发工作部署。

2 无线网络发展的分形特征

2010 年以苹果公司的 iPad 、iPhone 为核心的智能终端系列产品的出现，预示着多网多业务融合的宽带移动时代的正式来临。原来一直感叹 3G（第三代移动通信系统）部署开了，却没有“杀手级”应用的中国及欧美各大运营商惊奇地发现自己建成的宽带原来并不“宽”，仅智能手机的用户常规应用就已快速无情地将 3G 带宽吞噬，更不用说是多媒体应用了！而家庭小基站将使得原来封闭的蜂窝无线通信网直接开放给用户，并通过与 IP 技术的融合应用使全网变得越来越透明。这种透明融合本身将使得每个用户不但可以自由使用网络提供的服务，并能即时在网络上创造服务和提供服务，成为基于新一代开放网络的虚拟业务运营提供商。当前的无线手机用户普及程度已相当高。尽管目前的智能终端对带宽的要求已使得服务提供商们力不从心，但无线传感网、物联网的发展还方兴未艾，将形成成百亿虚拟用户。运营商在其中推波助澜，力图在更广阔的范畴内用通信生产生活方式代替传统生产生活方

[1] Internet Protocol,互联网协议

式，以通信产业渗透、部分代替其他传统产业，使通信业的收益最大化。当前已快处于饱和的 3G 网显然已经不能满足需求，这促使运营商加快能提供更大带宽的 4G（第四代移动通信系统）通信系统的发展。这种无线网络会有如下几个特点：

- 其基础技术 LTE－Advanced 引入了 IP 的扁平化网络架构，这种透明的架构再结合多跳中继和微小家用基站，使新一代无线通信网的生长具有分形的特点。
- 多跳中继及微小家用基站技术将导致无线网络的故障级联效应，现有控制管理方法将无法适应。
- 不仅网络结构具有分形特点，其业务流也将具有分形的特点。

上述无线网络的复杂分形现象其实在互联网络里早已出现，并且得到了相关研究的关注。目前提出的复杂网络科学研究模型主要有随机拓扑模型（Erdös and Rényi Model，ER 模型）[2]、瓦茨（Watts） 和斯特罗加茨 （Strogtz）提出的“小世界”模型(WS 模型) [3] 以及巴拉巴斯（Barabasi）和阿尔伯特（Albert）提出的无标度模型（BA 模型）[4]。其中 BA 模型中提出了两个重要的网络演化机理：增长和择优。通过拟合这两种属性，能够通过节点不断生长的方式构建出复杂网络。目前以家庭微蜂窝网、无线局域网（WLAN）等为主要接入的无线网络生长特性具备上述这些模型的特征。这意味着无线网络增长也符合分簇、满足一定幂律和分形维度。推算出它的这些模型对应的参数有可能实现对无线网络资源管理与业务控制的精确管理。图 1 给出了 1999 年的全球互联网络路由拓扑图，其 ER 模型的平均距离是 $\boldsymbol{L}=4.0$，遵从的幂律分布：

$\boldsymbol{P}(\boldsymbol{k})\sim \boldsymbol{k}^{-\gamma}$， $\gamma=2.2\sim 2.48$，簇系数 c= 0.3。

如用 WS 模型来描述，则其平均距离 $\boldsymbol{L}=14$，度分布函数是：

输出边 $\boldsymbol{P}_1(\boldsymbol{k})\sim \boldsymbol{k}^{-\gamma_1}$ $(\gamma_1=2.38\sim 2.72)$

输入边 $\boldsymbol{P}_2(\boldsymbol{k})\sim \boldsymbol{k}^{-\gamma_2}$ $(\gamma_2=2.1)$

依据此模型计算，当 99.5%以上的网站连接数均低于 100 次时，却有万分之四的网站大于 1000 次，十万分之三的网站超出 100000 次，因此，理论上来说只要整合 2 至 3 千个网站作为主流资源，就可以在很大的程度上满足百姓的日常需求。图 1 示出了出度为 3 的 BA 网络生成图，网络规模为 6000 的网络的入度分布。

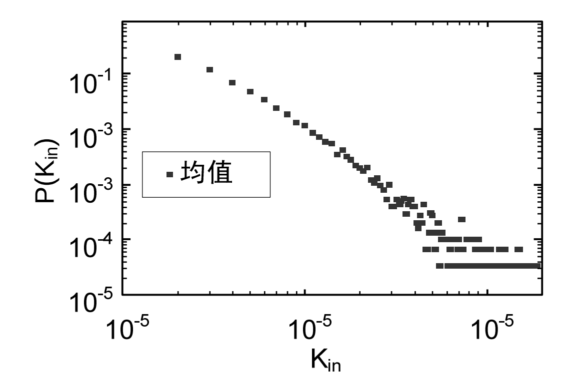


图 1. 出度为 3 的 BA 网络入度分布[5]

可以发现，无线网络系统的拓扑生长结构类似于动物体的肺部支气管树，它在某种程度上和城市下水道管网很接近，研究无线网络控制管理很大程度可以借鉴具有相似度特征的自然界类似分形体的生物控制方法。图 2 给出了一个肺部支气管网树的结构[6]。

在图 2 中，当确定了分叉数，对于不同的长度比和分叉级数就可以得到对应的流体输运的最佳值。类似地，如果我们能推导出无线网络增长分布的分形维数及其业务流的动力学方程，也就可以获得指导无线网络建设及资源控制管理的理论依据。在这方面，除了网络拓扑结构本身外，人们也一直在尝试寻找能够有像早期应用在电话网中的厄兰（Erlang[2]）公式那

[2] 早期电信文献有人译作“爱尔兰”

样可以简洁地描述流量和网络性能的关系，以便能更好地实施对网络流量的控制。我们都

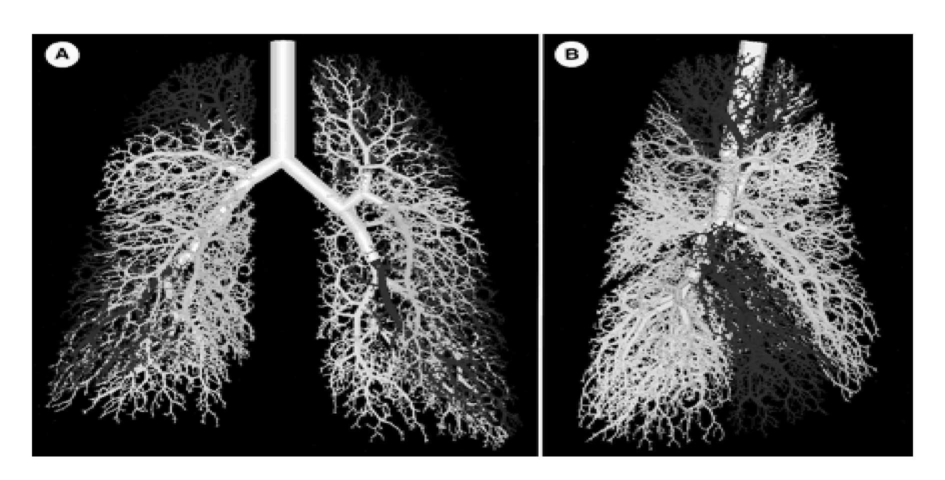


图 2. 肺部支气管树

知道，厄兰公式是基于独立同分布的泊松（Poisson）过程推导出来的。无线移动网引入 IP 后，智能手机的普及应用使得其用户流量具有自相似性，泊松过程并不适合其分析建模。因此，需要根据无线网络流量的新特性研究新的流量方程，即找出自相似流量和分形无线网络下的流量输运性质，作为控制管理无线网络的一个理论依据。另外，无线通信网络与其它自然体不同的是：网络的核心参与者是人。网络与人类社会已密不可分，人的社会复杂性完全带入到了网络中。而人这种个体的自我意识和群体意识带来的有限理性与个人偏好、参与网络时的历史性与决策智能性，使得无线网络系统已经演变成一个复杂的巨系统。从网络的拓扑结构到网络业务流均已呈现出完全的多元化与分形性。这种多元分形特征导致了网络增长和业务行为的复杂性。尽管无线网络架构的设计一直在不断地改进，网络控制管理也因计算机技术的应用而不断加强，但是人们对无线网络的增长行为与用户业务的行为理解还十分有限，相应的控制管理手段缺乏科学基础理论的支撑。在这样的情况下，根据无线网络增长行为及用户业务流的自相似特点研究无线网络动态演化规律的网络行为动力学已经成为一个新的极具挑战性的工作。它对于我们掌握未来无线网络增长行为的基本特征，发现网络用户行为的内在规律十分重要，并将为无线网络的科学管理、合理利用和有效控制提供科学的理论依据。

3 无线网络发展的分形动力学特征分析方法

网络分形动力学是研究网络动态演化规律的科学。自然界中不同类型的网络在其演化过程中既会表现出类似规律的动态行为，同时也有具备各自网络特点的动态演化行为。近年来，针对网络演进分形动力学和网络行为动力学的研究日益受到重视，取得的研究成果往往具有基础性、原创性等特点。因此被认为是关于网络的基础科学研究。网络动力学研究的目的在于认识网络演化和行为的规律，根据这些规律进行体系结构设计、算法设计等，引导网络健康发展。此外，网络动力学研究也可以从侧面验证网络设计原则、体系结构以及算法的性能。因此，网络动力学研究被认为是网络研究基础中的基础。关于网络动力学的研究方法简单介绍如下：

3.1 网络演进分形动力学

近年来，国际上的一些科学家使用统计物理学的方法，对具有分形特征的复杂通信网络系统进行研究。随机几何学就是在开展这种类型研究的基础上得到长足发展的。它的目的是

通过统计分析得到网络发展的随机拓扑特性，进而得到一般网络的演化规律。到目前为止，对通信网络分形特性研究得到的重要阶段性结论是：通信网络具有小世界特

表 1：各种网络主要拓扑特征一览

	平均距离	集聚系数	度分布
规则网络	大	大	δ 函数
随机网络	小	小	泊松分布
WS 小世界网络	小	大	指数分布
BA 无标度网络	小	小	幂律分布
很多真实网络	小	大	近似幂律分布

性和无标度特性。表 1 给出了几种网络主要统计特征量的对比。可以清楚地看到各种网络模型与实际网络之间的异同。在发现了网络的小世界特性和无标度特性的基础上，学术界掀起了研究复杂网络建模的热潮。研究网络拓扑结构规律的最终目的是为了了解各种网络的演化机制，以及拓扑规律的特性对网络上其他演化动力学的影响。往常研究网络动力学的抽象方法都是构建随机图，一旦意识到以往的随机图并不能真实地描述网络，那么在随机图上得出的动力学方程就可能不再适用。最新的研究多集中在审视以往所得到的规律。

3.2 网络信息流动力学

网络信息流的自相似是对互联网相关研究中的重要发现。勒兰德（Leland）[7]等人在 20 世纪 90 年代初期首先研究了网络中信息流的分布特征，并在 1994 年发表的研究论文中指出：以太局域网中传输的信息包，其到达时间在时间尺度上具有某种程度的自相似性，而且具有时间上的长相关性或突发性。这给传统上人们普遍使用泊松模型来表示网络传输的方式提出了挑战。随后的研究表明，在不同类型的网络以及网络的不同层次中，都不同程度地存在着这种自相似性或长程相关特性。这些研究成果的一个共同特点是研究的网络业务流基本上是以计算机应用为主产生的。这从一个侧面揭示了以计算技术平台为网络端节点的网络业务流特性，也间接暗示了智能手机和移动计算技术所产生的无线网络信息流既存在原来独立分布模式的业务流特性，也会具有自相似性，需要研究新的对其信息流动力学描述。目前研究人员还发现：在计算机网络中广泛存在着相变和幂率等复杂性现象。譬如对网络临界现象的研究重点是关注网络在拥塞和非拥塞两个状态之间的转换特征和条件分析。并且得出一个重要结论，即临界点处的网络状态才是网络工作效率最高的状态。另有一些学者研究了具有不同拓扑结构的网络模型的相变现象。大平（T. Ohira）等人[8]将网络的模型建立在二维网格状的拓扑结构上，相应研究了网络参数和路由选择策略对相变曲线的影响，指出只要精确地选择路由策略并调整其参数，就可以最大限度地推迟该网络达到拥塞相的相变过程，从而得到最好的网络性能。法克斯（H. Fuks）等学者[9]进一步给出了网络模型的形式化严格定义，并研究了增加网络中节点之间的连线(相当于增加网络中的通信线路)对网络相变行为的影响。结果发现，增加连接线路并不总是能够提高网络的性能，结果还强烈地依赖于网络中的路由选择策略。上述这些研究成果对于下一步开展无线网络信息流动力学研究具有重要的参考价值。

另外，通信网络业务数据流的控制管理与当前智能交通的车流控制管理有相当多的相似之处。在智能交通中应用的一些控制管理方法可以用到通信网络资源分配和业务控制管理中。在 2001 年《物理报道，(Physics Reports)》发表的一篇综述文章中，指出了用于描述交通流控的细胞自动机存在的自组织临界与相变等复杂性现象可以应用于计算机通信网络中[10]。对计算机网络自组织临界现象的研究目前的结论还不多。研究者们将计算机网络中出现的自组织行为划分为两个层次：节点层次和数据包层次，并通过简单的一维细胞自动机

模型分别进行研究，得到了计算机通信网络系统的行为表现出自组织临界现象。数据包层次的研究的基点是：网络节点对数据包流起着调节作用，反过来数据包流对节点的行为也有影响。在数据包层次上，主要关注的是数据包之间的相互作用，即数据包层次的整体行为。原来互不相关的数据包流，在经过节点的调制之后，可能会出现长程相关特性。

3.3 网络传播与逾渗动力学[3]

前面我们说过无线通信网络的高速发展使得“亚马逊蝴蝶效应”将有可能成为网络中的现实。事实上，当前手机病毒、计算机病毒和非法信息流在网络上引起的各类事件其实就是一种“亚马逊蝴蝶”事件。如何去描述和控制事件，一直也是通信网络运营所关注的焦点。帕斯特-萨托拉斯（Pastor-Satorras）等人[11]研究了计算机病毒在互联网的传播，发现其与生物传染病的传播有一定的相似性。不同的是生物体病毒的感染率只有超过一定的阈值才能真正地流行开来，否则病毒就会很快消失，而互联网上病毒的传播不一定存在这样的阈值。但对生物病毒的控制思想应该可以借用到通信网络控制中来。最新的关于网络传播和逾渗的研究方法是研究特定网络拓扑模型上的病毒传播特征和相关的动力学行为。已有研究表明，在无标度网络上并不存在什么阈值，那么一旦互联网某个地方感染了病毒，就会很快在网络上传播开来。因此，以往建立在随机网络上的病毒传播模型在新的网络拓扑结构上都需要进行再次验证，以建立符合实际网络传播特性的动力学方程。进而建立符合网络特征的信息传播动力学方程，设计防护策略增强网络安全性。

3.4 网络级联动力学

网络控制与管理中，对故障节点的隔离与恢复是一项重要内容。由于无线通信网越来越扁平化，基站越来越靠进用户侧，单一接入基站故障可能引发的级联灾变也越来越大。在现实生活中，级联效应的“灾变”随处可见，例如交通网络上发生的交通堵塞，通讯网络的突然中断，电力网络故障引起的大面积停电等等。通过研究这些灾变发生的机理和相关影响因素，可以指导无线网络拓扑结构和系统结构的优化设计，最大可能地避免这样的灾变发生。

描述网络上的级联反应并建立相应的控制模型是当前关于网络级联动力学研究的主要方向。比安科尼（Bianconi）和马西里（Marsili）[12]的研究方法是：想象大量信息包在计算机互联网上的传播。由于信息量的涨落，可能某一个节点上的信息量会达到或超过该节点的吞吐能力。此时如果还有信息包需要从这个节点通过，路由器会改信息包的路由，使它绕开拥塞节点。但是这种绕行也有可能导致路由器下游的其他节点拥塞，而这种拥塞又会要求更多的信息包绕行，从而有可能导致更多的节点拥塞。最早建立的微扰及相关级联反应模型是 BTW 模型[13]。该模型可以模拟实现自组织临界态（self-organized criticality, SOC），在这个状态下，对系统的微扰可以引起各种规模的级联反应。阿坎吉利斯（Arcangelis）和赫尔曼（Herrmann）[14]研究了小世界网络上的级联问题（AH 模型）。郭（音译，Goh）等人[15]研究了无标度网络上的级联问题，求得了级联反应规模分布函数与网络节点度幂律分布指数之间的关系（GLKK 模型），可以通过对网络级联动力学规律的模拟来研究网络节点遭受到相应攻击时是否会导致网络信息传输的中断及如何通过对网络某种方式的操作克服这种现象。

前述各研究工作的目的是为将来的无线网络资源分配、业务控制管理寻求科学理论的指导。正如前文所述，随计算技术与通信的融合，网络已经是人的社会的一部分。这种社会化的网络具有两个基本特点：

1）. 节点是人（智能体）与人群（多智能体）所使用或控制的；

[3] 逾渗动力学，percolation dynamics

2）. 连接是各种社会关系的反映，具有局域性，层次性。

正是因为这两个特点，使得网络的演进具备人性特点。我们研究其动力学行为，找出其动力学方程的基本参量，如：聚集性、度相关性、协同相似介数（Betweenness）、传递性、层次性和簇系数等，进而在科学上认识网络发展规律并为未来的网络建设提供指导。

4 计算所无线中心研发工作部署

根据信息技术发展和国家对信息产业的战略发展要求，无线中心结合自身无线移动通信领域多年的研究积累，制定如下研究目标：通过多天线、协作传输、中继、自组织网络、频谱共享、先进物理层传输、跨层优化等技术的研究，实现低成本、低能耗的宽带智能无线绿色通信系统。具体来说，就是要通过研究新型移动通信网络架构及传输技术，达到将系统功耗降低至目前系统功耗 1%的目标；通过研究、发展符合“网络行为动力学”的新型移动网络架构，形成引领国际学科研究发展的新方向；通过研究宽带无线三通技术，保障我军未来作战中的制通权。

上述总目标包含一个计划的制定实施、两项课题的支撑和三个方向的研究布局。

■ 一个计划是指无线“龙眼”网络计划（Longan Network），其涵义包括如下几方面：

- 低成本、低功耗的装备（Low Cost & Power）
- 多种无线平台的融合（Convergence）
- 智能无线资源及业务的控制管理（Intelligence）
- 主动自配置（Active Auto configuration）
- 接入自适应（Access Self-Adaption）
- 新型混合异构无线网（New Hybrid Wireless Network）

龙眼计划的制定不仅细化了宽带智能无线绿色通信的总体目标，而且将通信技术发展演进方向与无线中心学科前沿研究的实际情况紧密结合起来。通过该计划的实施，在未来 20 年内将产出一大批自主创新的核心科研技术成果，为我国通信产业发展提供核心技术支撑。

■ 两项课题是指“绿色无线通信系统研究课题”及“宽带三通研究课题”。

这是两项前沿研究课题。“绿色宽带无线通信系统的关键技术研究”的目标是通过研究新型移动通信网络架构及传输技术，实现网络结构的整体优化，降低系统功耗。“宽带三通网络技术研究”则主要紧紧围绕实现宽带“动中通”、“抗中通”和“扰中通”的战略目标，研究具备顽强生存能力、快速机动性能和协同互通能力的军事通信新技术和新装备，根据多重需求进行一体化的联合设计，以全面提高战术宽带无线通信系统的电子防御作战能力，保障我军未来作战中的制通权。

■ 三个方向是指前沿研究的布局可划分为以下三个方向：

- 网络体系架构研究方向：为满足绿色通信网络和宽带三通网络自配置、自愈合、自适应的要求，需要对网络结构进行整体优化。本方向主要从网络结构动力学的角度研究新型网络体系架构，着重顶层协议体系的设计。
- 无线资源管理研究方向：研究在混合环境中的无线资源管理体系和机制，自组织无

线资源分配架构，窄带、宽带业务联合的资源分配策略以及如何提高通信质量的协同分配方案等。

– 载波传输技术研究方向：研究低能耗、低干扰、高频谱效率的先进高速移动下的宽带无线传输技术，多载波协同分集传输、虚拟多天线技术等。

参考文献：

[1] 张玉成，应用系统科学方法论开展网络动力学研究建议报告，中科院计算所内部报告，2006

[2] Bollobás, B. (2001). Random Graphs (2nd ed.). Cambridge University Press. ISBN 0521797225

[3] D.J. Watts and S.H. Strogatz. Nature **393** (1998), p. 440. Full Text via CrossRef | View Record in Scopus | Cited By in Scopus (6779)

[4] Albert-László Barabási & Réka Albert (October 1999). "Emergence of scaling in random networks". Science 286: 509–512. doi:10.1126/science.286.5439.509.

[5] 汪秉宏，双结构万维网的理论依据，中国科学技术大学报告，2005

[6] Kitaoka H. Takaki R. Suki B. A three-dimensional model of the human airway tree. J Appl Physiol 1999; 87: 2207-2217

[7] W. Leland, M. Taqqu, and D. Wilson, "On the self-similar nature of ethernet traffic (extended version)", IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 2, pp. 1 - 15, 1994.

[8] T. Ohira and R. Sawatari. Phys. Rev. E 58 (1998), p. 193. APS full text | Full Text via CrossRef | View Record in Scopus | Cited By in Scopus (125).

[9] Fuks, H., Lawniczak, AT: Performance of data networks with random links. Mathematics and Computers in Simulation 51 (1999) 101-117

[10] Chapman, S. C. and N. W. Watkins, Avalanching and Self-Organised Criticality, a paradigm for geomagnetic activity? Space Sci. Rev. 95, 293-307 (2001).

[11] R. Pastor-Satorras, A. Vázquez, and A. Vespignani. Dynamical and correlation properties of the internet. Physical Review Letters, 87 (25): 258701 (4), 2001

[12] G. Bianconi, M. Marsili, Phys. Rev. E 70 (2004) 035105.

[13] Bak, P., Tang, C. and Wiesenfeld, K. (1987). "Self-organized criticality: an explanation of 1 / f noise". Physical Review Letters 59: 381–384

[14] L. DE ARCANGELIS, H.J. HERRMANN, Self-organized criticality on small world networks, Physica A, 308, 545-549 (2002), cond-mat/0110231;

[15] K. -I. Goh, D. -S. Lee, B. Kahng and D. Kim, Phys. Rev. Lett. 91, 148701(2003).

作者简介：

石晶林： 中国科学院计算技术研究所无线通信技术研究中心，研究员，博士生导师 sjl@ict.ac.cn

张玉成： 中国科学院计算技术研究所无线通信技术研究中心，08 级博士生 zhangyucheng@ict.ac.cn